

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

В.о.завідувача кафедри

Анатолій ОРЛОВ

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 2020 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за спеціальністю 153 Мікро-та наносистемна техніка

(код і назва)

на тему: *Кремнієві структури метал-діелектрик-напівпровідник стекового типу*

Виконав: студент 4 курсу, групи ДП – 62

(шифр групи)

Морозов Дмитро Вадимович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник асист. каф. МЕ Любомир КОРОЛЕВИЧ

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю

доц., к.ф.-м.н., с.н.с. Георгій СВЄЧНИКОВ

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н., Юрій ДІДЕНКО

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2020 року

РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена метал-діелектрик-напівпровідник структурам стекового типу. Метою роботи є описання проблеми заміни SiO_2 в МДН-структурах на інші діелектрики та описання стекової структури з діелектриком з високою діелектричною проникністю (high-k).

У роботі приводиться інформація про використання діелектриків, які замінили SiO_2 через ряд переваг, які також були описані. Загальний обсяг роботи: 56 сторінок, 16 ілюстрацій, 10 посилань, 0 додатків.

Ключові слова/аббревіатури роботи: МДН, МДНТ, МОН, структура, MOSFET, CMOSFET.

ABSTRACT

This thesis is devoted to metal-dielectric-semiconductor stack-type structures. The aim of this work is to describe the problem of replacing SiO_2 in MDN structures with other dielectrics and to describe the stack structure with a dielectric with high dielectric constant (high-k).

The paper provides information on the use of dielectrics that have replaced SiO_2 due to a number of advantages that have also been described. Total volume of work: 56 pages, 16 illustrations, 10 links, 0 appendices.

Keywords / abbreviations of work: MDS, MDST, MOS, structure, MOSFET, CMOSFET.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Зміст..... | 2 |
| Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів | 5 |
| Вступ..... | 6 |
| 1. Короткоканальні ефекти в транзисторах зі структурою метал-діелектрик-напівпровідник | 7 |
| 2. Масштабування | 15 |
| 3. Германій як заміна кремнію в транзисторах зі структурою метал-діелектрик-напівпровідник..... | 19 |
| 4. Транзистори метал-діелектрик-напівпровідник на основі діоксида алюмінія (Al_2O_3) | 21 |
| 5. Транзисторний ефект..... | 22 |
| 6. Особливості застосування high-k діелектриків..... | 28 |
| 7. Зарядові явища в high-k діелектриках на прикладі діелектричного стека діоксид кремнію – діоксид гафнію | 30 |
| 8. Тунельно-тонкий діелектрик SiO_2 | 34 |
| 9. Кореляція між high-k матеріальними константами..... | 39 |
| 10. MOSFET: Основи та характеристики | 40 |
| 11. Діелектричні матеріали на основі гафнію | 42 |
| 12. Контакт метал-напівпровідник (бар'єр Шоткі)..... | 46 |
| 13. Ідеальний MOSFET | 48 |
| 13.1. Лінійний режим | 48 |
| 13.2. Класична модель | 49 |
| Висновки | 52 |
| Перелік використаної літератури | 54 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ОПЗ – область просторового заряду

МДН – метал-діелектрик-напівпровідник

МН – метал-напівпровідник

МОН – метал-оксид-напівпровідник

ФСС – фосфорно-силікатне скло

RSCE – зворотний короткоканальний ефект (Reverse Short-Channel Effect)

EOT – еквівалентна товщина оксиду (Equivalent Oxide Thickness)

CMOSFET – діелектрик із затворним ефектом додаткового каналу MOS Field Effect

MOS / MIS – напівпровідник металевого оксиду / ізолятора

ВАХ – вольт-амперна характеристика

ВСТУП

Багатошарові структури метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-структури) пов'язують з розвитком планарних технологій і це є майже основою напівпровідникових приладів, де використовують ефект поля: приладів із зарядним з'єднанням, польових транзисторів з ізольованим затвором, репрограмованих елементів пам'яті з плаваючим затвором та ін. МДН-структури досить широко використовують для вивчення фізичних процесів там, де є границя поділу діелектриків з напівпровідниками.

Метал-діелектрик-напівпровідник-структура (МДН-структура) – являє собою структуру, що утворена пластиною напівпровідника (П), шаром діелектрика (Д) на одній з її поверхонь і металевим електродом (затвором М, рис. 1). Елементарніша МДН-структура являє собою багатошарову структуру, яка включає в себе монокристалічну пластину напівпровідника з омичним контактом, на незайняту поверхню якої був ще нанесений надтонкий діелектричний шар, що покрили металевим електродом. Напівпровідникова пластина називається підкладкою, металевий електрод, який нанесений на шар діелектрика, - затвором, а діелектрик називається підзатворним діелектриком. Дуже часто напівпровідників в МДН-структурах є кремній, а під діелектриком використовують діоксид кремнію (SiO_2), тому для МДН-структур використовується ще й ім'я МОН-структури, що являє собою метал-ОКСИД-напівпровідник. Товщина підзатворного шару діелектрика існує в діапазоні від 15-20 до $(1-2) \cdot 10^3 \text{ \AA}$, а лінійні розміри МДН-структур уздовж поверхні підкладки становлять від кількох мікрон до кількох міліметрів і більше. Проста структура МДН - це конденсатор МДН, у якого ємність залежна від напруги між електродами.

1. КОРОТКОКАНАЛЬНІ ЕФЕКТИ В ТРАНЗИСТОРАХ ЗІ СТРУКТУРОЮ МЕТАЛ-ДІЕЛЕКТРИК-НАПІВПРОВІДНИК

SiO_2 вже не використовують, тому що при переході до нано розмірів вони стають тунельно прозорими. На їх місце запропоновано high-k діелектрики. Але між напівпровідником та high-k діелектриком створюють тунельно-тонкий діелектрик і отримують так звану стекову структуру для зменшення щільності поверхневих станів.

Якщо на МДН-структуру подається напруга, в напівпровіднику поблизу границі з діелектриком виникає електричне поле. Поле перерозподіляє заряди в напівпровіднику, змінюючи концентрацію носіїв заряду поблизу поверхні, і таким чином змінює електропровідність приповерхневого шару напівпровідникової пластини (рис. 1.) Властивості МДН-структур вперше досліджували американські фізики У. Шоклі (W. Shockley) і Дж. Л. Пірсон (G. L. Pearson).

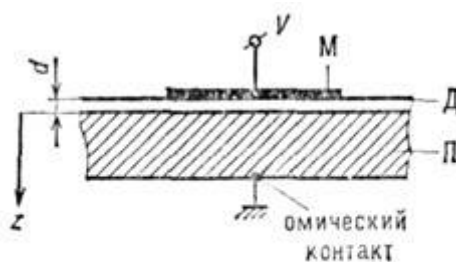


Рис. 1.

Рисунок 1 – МДН-структура

Багатошарові структури МДН-структури (рис. 2) зв'язані з розвитком планарних технологій і стоять у більшості напівпровідникових приладів, де використовується явище під назвою «ефект поля»: приладів із зарядним зв'язком, ізольованими затворами у польових транзисторах, перепрограмуючих елементів пам'яті з плаваючим затвором. МДН-структури

дуже часто використовуються для експериментів з фізичними процесами на поділі діелектриків із напівпровідниками.

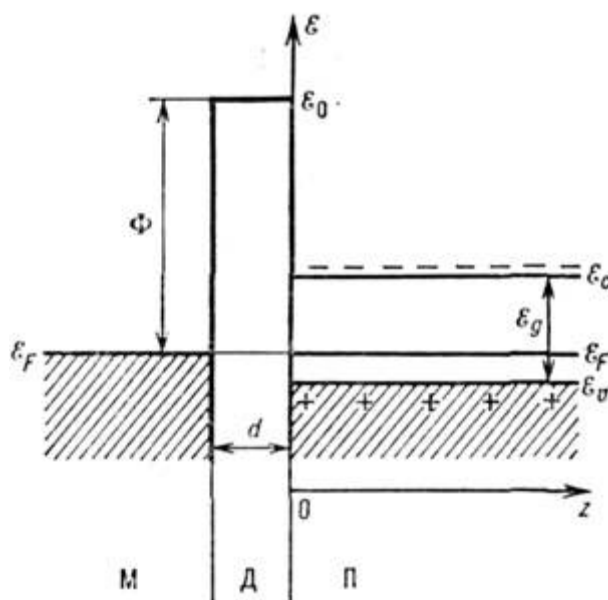


Рисунок 2 – Енергетична діаграма МДН-структури на основі напівпровідника р-типу при відсутності напруги V на затворі. Заштриховані стани, зайняті електронами при $T = 0\text{K}$; F - робота виходу металу; ε_g - енергія електрона в вакуумі; ε_v – поверхня валентної зони; ε_c - дно зони провідності; ε_F - рівень Фермі; E_a - ширина забороненої зони напівпровідника.

Прикладена напруга до МДН-структур визначають позитивною напругою, якщо на затвор подано потенціал з позитивним значенням відносно омічного контакту до підкладки, і негативною, при тій умові, якщо відносно омічного контакту до підкладки на затвор поданий негативний потенціал.

Аналізуючи МДН-структури, часто застосовується модель ідеальної МДН-структури, так як для неї характерні припущення в стилі:

- Термодинамічні роботи по виходу електронів з металу і напівпровідника такі ж самі $\chi_m = \chi_p$, через це енергетичні зони напівпровідника не вигнуті за відсутності зовнішнього

- електричного поля енерго зони напівпровідника не вигнуті (стан плоских зон);
- Поверхневі стани на поділі напівпровідника і діелектрика, а також відсутність зарядженої середини в діелектрику. Тобто з'являється при дії будь-якого зовнішнього електричного поля тільки заряд в підкладці і заряд протилежного знака на затворі, який дорівнює його величині;
 - Коли є постійна дія зовнішньої напруги заданої величини, відсутнє перенесення носіїв заряду через діелектрик, це означає, що опір діелектрика постійному струму надвеликий.

МДН-структури, які можна назвати ідеальними, отримують на основі використання "хлорної" технології термічного вирощення двоокису кремнію (SiO_2) на кремнії. Можна зазначити, що для кремнію типу n (n-type) в якості матеріалу затвора використовується алюміній, а для кремнію типу p (p-type) - золото.

Подача напруги на МДН-структуру під затвором викликає електричне поле. Так як в ідеальному діелектрику немає незв'язаних зарядів, то електричне поле не екранується, а проникає в приповерхневий шар підкладки, і там він змінює концентрацію носіїв заряду. В залежності від полярності і величини прикладеної напруги, приповерхневий шар підкладки проявляється в режимі інверсії, або збагачення, або збіднення.

І якщо на МДН-структуру подається позитивна напруга, то напруженість електричного поля направляється до підкладки від затвора. У напівпровіднику n-типу таке поле примагнічує вільні електрони з напівпровідника до границі розділу напівпровідник-діелектрик. В результаті чого, в приграничній області напівпровідника з'являється великий негативний заряд, який через дифузійне вирівнювання концентрації електронів міститься в шарі кінцевої товщини, що має назву «область просторового заряду (ОПЗ)». Концентрація найосновніших носіїв заряду,

тобто електронів, в області просторового заряду більша за концентрацію в об'ємі кристала. Тобто це означає, що ОПЗ є шаром збагачення, а МДН-структура при цьому в режимі збагачення. Електричне поле зменшує потенційну енергію електронів в ОПЗ, якщо порівнювати з енергією електронів в напівпровіднику, тому край енергетичних зон в ОПЗ зігнуті вниз. Це означає, що на кордоні розділу напівпровідника і діелектрика для електронів у процесі з'являється потенційна яма (рис. 3). У діелектрику через відсутність великого заряду напруженість електричного поля залишається постійною, через це енергія електронів, переходячи від затвора до напівпровідника за лінійним законом тільки збільшується.

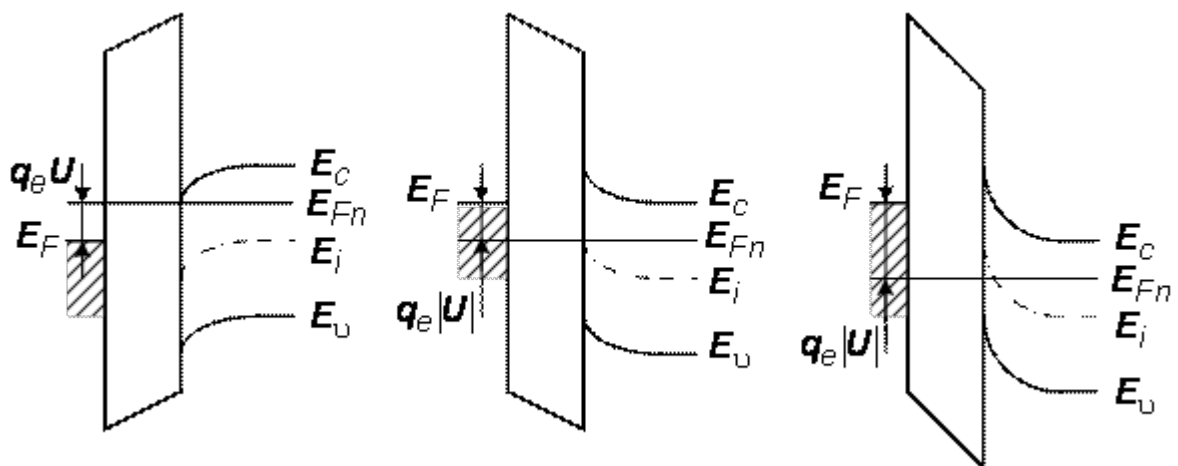


Рисунок 3 – Потенційна яма на кордоні розділу

Відбулась велика кількість тестувань, де були вбудовані в Sentaurus TCAD моделі електрофізичних ефектів. Вибрані моделі, що створюють адекватний опис глибоких субмікронних МДН-структур з high-k діелектриком (діелектриком з високою діелектричною проникністю) затвора. Також були розраховані струми витоку 45-нм МДН-структури з полікремнієвих затворів і SiO_2 , $\text{SiO}_2 / \text{HfO}_2$, HfO_2 діелектриком затвора. Показано, що заміна діелектрика SiO_2 , який став звичним і традиційним, на еквівалентний їй діелектрик HfO_2 у велику кількість разів зменшує струм витоку затвора, за рахунок виключення впливу ефекту тунелювання. При

цьому гранична напруга, струм насичення, рухливість носіїв в каналі, крутизна ВАХ деградує в допустимих межах 10-20%.

По ідеальному сценарію конфігурація МДН транзистора повинна забезпечувати повний контроль зарядів в каналі зарядом на затворі. Це в значній мірі визначається геометричною конфігурацією транзистора. Для того, щоб охарактеризувати ступінь ідеальності транзистора, іноді використовують поняття електростатичної якості (electrostatic integrity). Електростатична якість виражається в ступені виконання двох наступних вимог:

- кожен заряд на затворі індукуює заряд в каналі;
- заряд в стоці не повинен впливати на заряд в каналі.

У реальних транзисторів з будь-якою технологічною нормою ці вимоги не виконуються повною мірою. На заваді стають інші чинники:

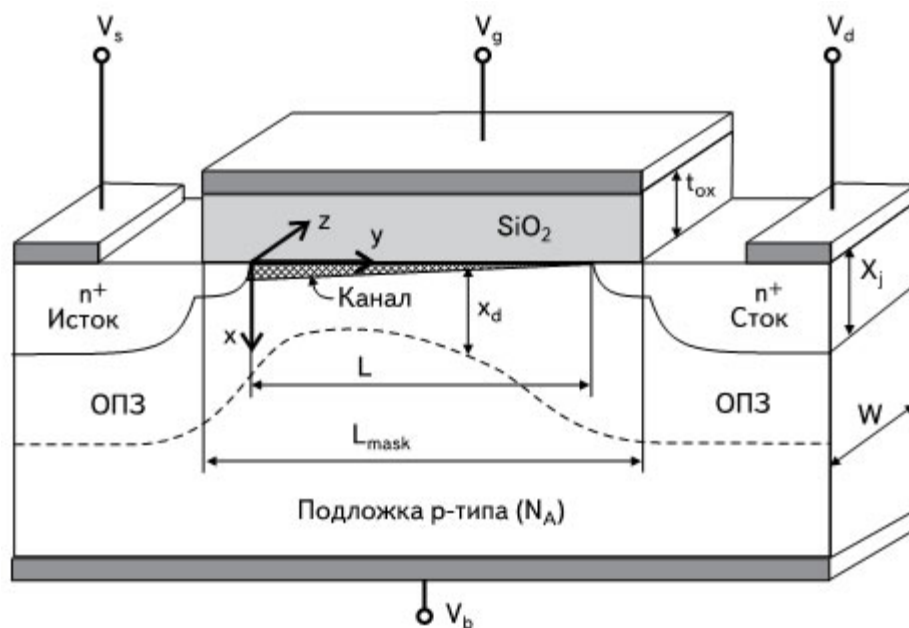
- Заряд в збідненої області і на поверхневих станах. Для транзисторів, виготовлених по об'ємної технології, заряд збідненого шару усунути неможливо, оскільки він є фактором, що забезпечує необхідну електростатику;
- Геометричний фактор. І для вузьких, і коротких каналів істотну роль починають грати крайові ефекти. Частина силових ліній від затвора йде на краї і/або на інші електроди. У цьому випадку кількість заряду в каналі і, відповідно, гранична напруга стає глобальною характеристикою всього транзистора і залежить, зокрема, від довжини каналу і конфігурації стоку. Особливо істотні такі ефекти в сучасних нанорозмірних транзисторах, в яких все більш значною стає роль крайових ефектів.

Граничні ефекти порогової напруги (короткоканальний і вузькоканальний ефекти) зменшується зі зменшенням довжини каналу. Способи боротьби з ефектом спаду порога складаються:

- У формуванні більш тонких шарів р-n-переходу (зменшення t_j);

– По-друге, в зменшенні товщини збідненої області x_d .

І те, і інше досягається за рахунок збільшення концентрації легуючої домішки в підкладці в районі каналу або у стоку (витоку). Зауважимо однак, що при зменшенні довжини каналу порогова напруга може і зростати внаслідок зворотного короткоканального ефекту (Reverse Short-Channel Effect - RSCE), що викликається перерозподілом домішки в області каналу через нестационарну прискорену дифузію домішки.



Рисисунок 4 – Фізична структура типового субмікронного n-канального МОН-транзистора

Тут ОПЗ - область просторового заряду; SiO_2 - підзатворний діелектрик; t_{ox} - товщина оксиду; X_j - глибина залягання p-n-переходів; W - ширина каналу; L - довжина каналу; L_{mask} — довжина каналу по фотошаблону; V_d , V_b , V_s - напруги (потенціали) стоку, затвора, підкладки і витоку відповідно. Сенс інших позначень ясний з малюнка і буде докладніше розшифрований в міру їх згадки.

Вважалося, що в довгоканальних МОН-транзисторах (рис. 4) струм затвора дорівнює нулю, оскільки він відділений від підкладки шаром оксиду кремнію. Однак при зменшенні розмірів транзистора, то товщина оксиду стає

такою малою (менше 5 нм), що тунельний струм через затвор стає великим. Імовірність тунелювання експоненціально зростає зі зменшенням товщини оксиду t_{ox}

Зонна діаграма (рис. 5), яка пояснює виникнення тунельного струму, показана на рис. тут V_{ox} - падіння напруги на оксиді, $V = Q_g/C_{ox}$; χ_b - потенційний бар'єр для електронів на границі Si-SiO₂; j_g - щільність тунельного струму електронів зони провідності через оксид з інверсійного шару в полікремнієвий затвор.

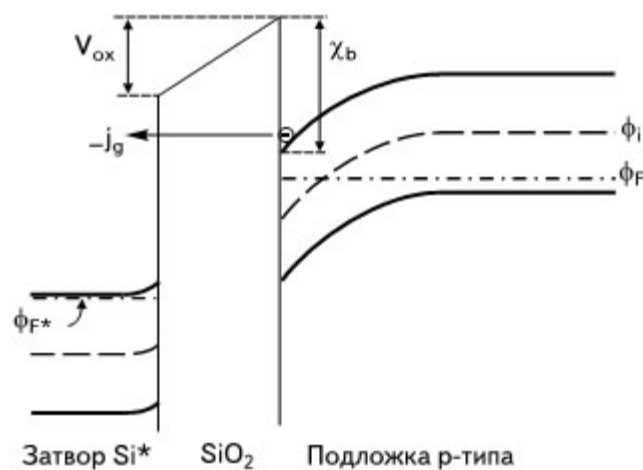


Рисунок 5 – Зонна діаграма л-канальної МОН-структури в режимі інверсії

Щільність тунельного струму пропорційна кількості електронів на одиницю площі поверхні N і ймовірності P_{tun} тунелювання електронів в секунду.

Графік залежності струму затвора від напруги затвор-витік показаний на рис. 6 Щільність струму приблизно експоненціально зростає зі зменшенням товщини оксиду.

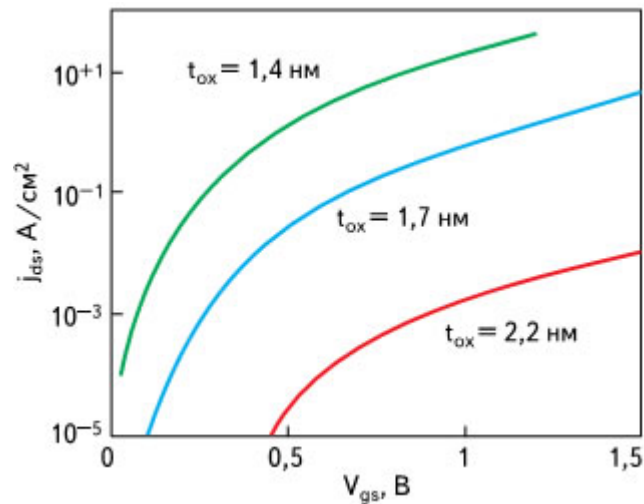


Рис. 6. Щільність струму затвора л-канального МОН-транзистора як функція від напруги затвор-витік для різних значень товщини оксиду t_{ox} ; $V_{ds} = V_{bs} = 0$;

Тунельний струм затвора (рис. 7) протікає в підкладку (I_{gb}), а також в області витоку і стоку через канал (I_{gt} , I_{gd}) і через області перекриття (I_{gj}), рис.

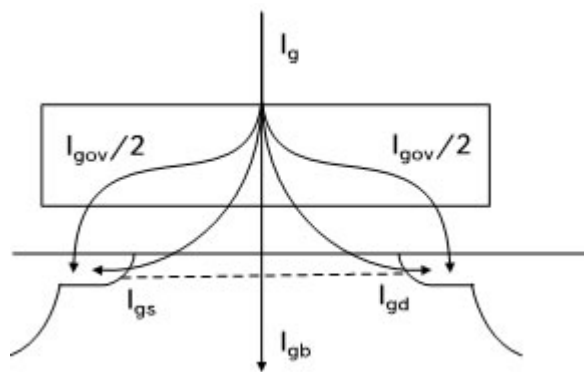


Рисунок 7 – Тунельний струм затвора є сумою чотирьох компонентів

Для зниження тунельного струму замість традиційного SiO_2 використовують діелектрики з високою діелектричною проникністю (high-k dielectric), які дозволяють збільшити товщину діелектрика при збереженні питомої крутизни транзистора.

2. МАСШТАБУВАННЯ

Польові пристрої з МДН-структурою через універсальність характеристик досить часто використовуються в інтегральних схемах (ІС). Майже найголовніше завдання мікроелектроніки можна описати в підвищенні швидкодії ІС. Для інтегральних схем на МДН-пристроях через дуже гнучку технологією їх створення це завдання може вирішуватись декількома варіантами. На базі одного з найголовніших підходів лежить принцип подвійної дифузії. Ця технологія називається Д-МОН технологією, якщо структура планарного виду, і V-МОН технології при умові, що структура транзистора вертикального виду. Інший варіант підходу має тісний зв'язок з пропорційним зменшенням звичайного МДН-транзистора і отримав назву N-МОН технології, або високоякісної.

Виходячи з основних установ моделі пропорційної мікромініатюризації, коли довжина каналу зменшується N разів для підтримки однакових характеристик транзистора, інші його параметри (товщина оксиду, ширина каналу, напруга живлення) повинні бути зменшені N разів, та збільшити в N раз концентрацію легуючої домішки в підкладці. При такій зміні значення порогової напруги V_T і значення провідності каналу не зазнавало змін. Швидкодія, що визначається часом прольоту носіїв через канал, збільшиться в N раз, струм каналу зменшиться в N разів, розсіюювача потужність зменшиться в N^2 разів. У таблиці, яка приведена нижче показана динаміка змін основних параметрів МДН-приладів, які проявляються пропорційною мікромініатюризацією.

Пропорційна мікромініатюризація та її характеристики дають змогу використовувати функцію масштабування МДН-транзисторів при розробці ІС на їх же основі. Саме цей спосіб підходу надав можливість фірмі Intel модернізувати процесори ПК кожні три-чотири роки. У таблиці, що показана

нижче, наведені етапи по роках пропорційної мікромініатюризації процесорів Intel за період 1971-2000pp (табл. 1).

Табл. 1. Еволюція пропорційного масштабування
у процесорах Intel за період 1971-2000pp.

<http://solidstate.karelia.ru/book/chapter6/part17.shtml>

| Модель | Рік випуску | Транзистори, шт | Тех.процес, мкм | Тектова частота, МГц |
|-------------|----------------|--------------------|--------------------|-------------------------|
| 4004 | 1971 | 2 250 | 10 | 0,108 |
| 8008 | 1972 | 2 500 | 10 | 0,2 |
| 8080 | 1974 | 5 000 | 6 | 2 |
| 8086 | 1978 | 29 000 | 3 | 5-10 |
| 286 | 1982 | 120 000 | 1,5 | 6-12,5 |
| 386 | 1985 | 275 000 | 1,5-1 | 16-33 |
| 486DX | 1989 | 1 180 000 | 1-0,6 | 25-100 |
| Pentium | 1993 | 3 100 000 | 0,8-0,35 | 60-200 |
| Pentium II | 1997 | 7 500 000 | 0,35-0,25 | 233-450 |
| Pentium III | 1999 | 24 000 000 | 0,25-0,13 | 450-1300 |
| Pentium 4 | 2000 | 42 000 000 | 0,18-0,13 | >1400 |

Багатолітні дослідження МДН-транзисторів з довжинами каналу 0,25-0,1 мкм дає розуміння, що в таких пристроях різко зростає кількість нових фізичних (і квантових) явищ. Принципи пропорційного масштабування при таких значеннях лінійних розмірів вже стає нероботоспроможним.

Масштабування проводилося за певним законом (правилом), який був приведений в дію Р. Деннардом. Сенс закону полягає у рівному зменшенні елементів, але не при цьому дані не повинні бути змінені, тобто при зменшенні розмірів необхідно зберігати незмінним значення напруженості електричного поля в будь-якому елементі транзистора. Якщо зменшити довжину затвора в k разів і одночасно знизити робочу напругу в стільки ж

разів, то час затримки логічного елемента скоротиться в k раз. Також було визначено, що товщина підзатворного діелектрика d співвідноситься з довжиною каналу L_k по залежності $d = L_k/45$. При наближенні довжини каналу до розмірів менше мікрона виникли проблеми, що вимагають введення ряду додаткових технологічних операцій для того, щоб зменшення довжини каналу приносило бажаний результат. Наприклад, вже при $L_k \sim 45$ - 65 нм товщина підзатворного діелектрика досягає одиниць нанометрів, що призводить до занадто великих тунельних струмів витоку канал-затвор, що значно збільшує розсіювання потужності і зменшує крутизну вольтамперної характеристики транзистора. Цю проблему вирішили за допомогою заміни загальноприйнятого оксиду (або оксинитрида) кремнію high-k діелектриком.

Однак важливо пам'ятати, що під high-k діелектриком все ще знаходиться тонкий шар SiO_2 , що визначає параметри кордону розділу. Слід зазначити, що при розрахунках МДН-ємності застосовується параметр «еквівалентна товщина оксиду» (EOT - Equivalent Oxide Thickness).

Еквівалентна товщина high-k діелектрика для забезпечення незмінної ємності:

$$EOT = d_{high-k} = (k_{high-k} / k_{ox}) d_{ox}$$

Таким чином, використання альтернативних діелектриків з більш високою діелектричної проникністю дає змогу в стільки разів збільшити товщину діелектричного шару в порівнянні з товщиною діоксиду кремнію, у скільки разів діелектрична проникність речовини більша за діелектричну проникність діоксиду кремнію, а збільшення товщини шару діелектрика дає можливість зменшити струми витоку (рис. 8).

Найвища рухливість електронів (табл. 2) спостерігається в InAs, а дірок - в Германії. Зрозуміло, що для комплементарної структури метал-оксид-напівпровідник -схем, де беруть участь n- і p-МДН транзистор, найбільш

переважними за величиною рухливості є InGaAs і Ge для n-MOS і p-MOS відповідно.

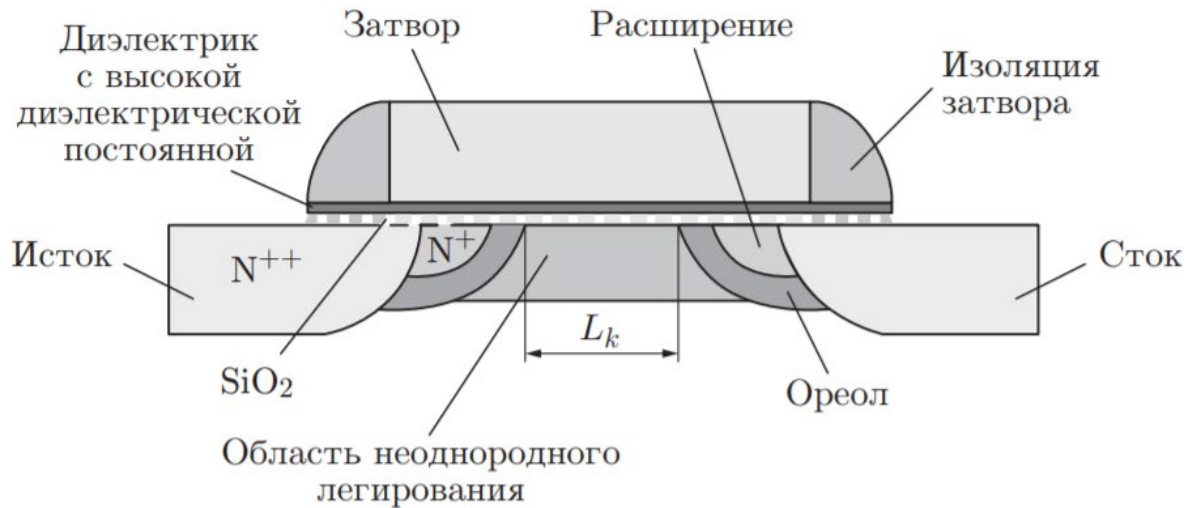


Рисунок 8 – МДН-транзистор. Застосування high-k діелектрика для ослаблення небажаних короткоканальних ефектів, зміна профілю легування при формуванні областей витоку і стоку в горизонтальному напрямку (розширення і ореол) і неоднорідне легування області каналу і підкладки під ним у вертикальному напрямку.

Табл. 2. Таблица рухливості у матеріалах

[<https://www.sibran.ru/upload/iblock/ccc/ccc924e0cbb854ad0a606b6f64320b5d.pdf>]
f]

| Матеріал | Рухливість електронів, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ | Рухливість дірок, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ |
|----------|---|--|
| Si | 1350 | 280 |
| Ge | 3600 | 1800 |
| GaAs | 8000 | 300 |
| InGaAs | 11200 | 300 |
| InAs | 30000 | 450 |

3. ГЕРМАНІЙ ЯК ЗАМІНА КРЕМНІЮ В ТРАНЗИСТОРАХ ЗІ СТРУКТУРОЮ МЕТАЛ-ДІЕЛЕКТРИК-НАПІВПРОВІДНИК

Перший етап в технології Ge-МДН транзисторів - створення багатошарового «діелектричного пакету» на поверхні Ge. Початком цього процесу стала поверхнева обробка в окислювально-розчинному хімічному травнику. Його дія, як і у випадку термічного окислення кремнію, дозволила перемістити поверхню від дефектної первинної поверхні вглиб до кристалу з малими дефектами. У той же час на поверхні утворюється шар аморфного GeO_2 .

Крім того, був розроблений спосіб нанесення двошарового діелектрика $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ при досить низьких температурах (650-700 °C) для запобігання деградації сформованої раніше границі розділу Ge - GeO_2 . В результаті межа розділу такої структури володіє в середині забороненої зони концентрацією швидких станів $\sim(3 \cdot 10^{11}) \text{ см}^{-2} \cdot \text{В}^{-1}$. Заряд плоских зон складає величину $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Необхідно ще також відзначити те, що присутність подвійного діелектрика забезпечило високу стабільність структури до навколишнього середовища і до подаваної на затвор напруги. Досить надійну маскуючу дію дає можливість проводити фотолітографічні процеси. Маскою для формування витоку і стоку дифузією миш'яку служив шар SiO_2 товщиною $\sim 1200 \text{ Å}$. В результаті процесу дифузії виходили леговані області, які були глибиною в 1-1,2 мкм із середньою концентрацією донорів $10^{19}\text{-}10^{20} \text{ см}^{-3}$. Далі на поверхню Ge між витоком і стоком після видалення маски наносився подвійний діелектрик $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ і напилювався Al для створення за допомогою фотолітографії контактів до витоку, стоку і електроду затвора.

Поліпшення параметрів кремнієвої мікро- і наноелектроніки за рахунок зменшення розмірів, зміни конструкції і т. д. з початку ХХІ століття стало

швидко просуватися до насичення. У той же час Ge привернув пильну увагу в як матеріал для створення транзистора з високою рухливістю носіїв заряду в каналі.

Однією з основних проблем при розробці Ge-МДН транзисторів є отримання якісної межі Ge - діелектрик. Причому весь діелектричний пакет повинен забезпечувати можливість маскуванню при проведенні фотолітографії, легування та інших технологічних операцій в процесі формування транзистора.

З огляду на досвід розвитку кремнієвої нанoeлектроніки, щоб отримати високі параметри масштабуючого (малого розміру) Ge-МДН транзисторів, необхідно використовувати діелектрик з високою діелектричною сталою (high-k), але при цьому межа розділу Ge - діелектрик повинна зберегти малу щільність поверхневих станів N_{ss} і високу рухливість носіїв заряду в при поверхневому шарі. Тому більшість розробників намагалися нанести high-k діелектрик на Ge, а вже потім формувати кордон розділу Ge - GeO_2 . Відомо, що high-k діелектрик може бути полікристалічним і в процесі термічної обробки атоми Ge можуть в нього дифундувати на межі зерен, а це різко спогіршує електричні властивості МДН транзистора. Тому необхідно створити дифузний бар'єр для запобігання реакції на межі поділу між high-k оксидами металу і поверхнею германію. Для пасивації поверхні застосовувалися: обробка в NH_3 і в HF_2 , нанесення SO_2 і плазмова окислювальна обробка. Однак ці зусилля не привели до отримання досить якісних структур.

Найбільш вдалим рішенням для створення Ge-МДН транзисторів с високими параметрами виявилось термічне вирощування тонкого проміжного шару GeO_2 і подальше нанесення шару Al_2O_3 . У цих роботах отримані величини рухливості в каналі $\mu_n \sim 800 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$ і $\mu_p \sim 400 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$, а мінімальна щільність поверхневих станів була на рівні $10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{ЕВ}^{-1}$, що перевищувало результати для Si-МДН транзисторів.

4. ТРАНЗИСТОРИ МЕТАЛ-ДИЕЛЕКТРИК-НАПІВПРОВІДНИК НА ОСНОВІ ДІОКСИДА АЛЮМІНІЯ

Розширення діапазону напівпровідникових конструкцій, що застосовуються в мікроелектроніці, за собою несе при відносно низьких температурах отримання високоякісних діелектричних шарів, що дозволяє уникнути деградації поверхні напівпровідників. З цього боку, перспективні шари оксиду алюмінію Al_2O_3 , синтезовані методом молекулярного нашарування. Даний матеріал має високе значення діелектричної проникності ($\epsilon = 10$) і є претендентом на заміну підзатворного SiO_2 ($\epsilon = 3,9$) в МДН-транзисторах. Також плівки Al_2O_3 мають малі струми витоку, якщо зрівнювати з HfO_2 (також це широко використовується в транзисторах).

Конденсаторні структури з плівками з оксиду алюмінію можуть бути корисні як сенсори вологості ємнісного виду, вони мають досить високу чутливість і високу швидкодію. Також доволі перспективним є використання аморфного оксиду алюмінію і в якості блокуючого шару під ФЛЕШ-елементах пам'яті (≈ 5 нм), які засновані на локалізації заряду на квантових стиках і виготовлених переважно на базі нітриду кремнію. До сьогодні, на превеликий жаль, приділялося дуже мало уваги дослідженню діелектричних характеристик шарів Al_2O_3 , хоча дослідження такого роду необхідні для встановлення кореляції між процесами діелектричної поляризації і переносу заряду, що необхідно при визначенні надійності роботи напівпровідникових систем та електронних пристроїв на їх основі.

5. ТРАНЗИСТОРНИЙ ЕФЕКТ

Транзисторний ефект в кремнієвих МДН структурах з тунельно-тонким діелектриком був відкритий в сімдесяті роки і детально вивчений в структурах $\text{Al} / \text{SiO}_2 / \text{n-Si}$. Цей ефект пояснюється істотною відмінністю в величинах тунельних струмів електронів і дірок: в умовах сильної інверсії зон на поверхні напівпровідника ток електронів, інжектуючих з металу в напівпровідник, може перевершувати струм дірок, що надходять на поверхню для компенсації їх витоку з інверсійного шару в метал, що фактично і означає посилення діркового струму, що надходить в інверсійний шар. Незважаючи на досить розвинену теорію тунельної МДН структури, важко навіть грубо передбачити величину коефіцієнта посилення струму в випадку SiO_2 -структур з тієї причини, що немає інформації про величини енергетичних бар'єрів на кордоні тунельно-тонкого SiO_2 з SiC .

Фототранзисторний ефект в тунельній МДН структурі полягає в наступному. При подачі на МДН структуру напруги зсуву, відповідного режиму інверсії, ця напруга ділиться між збідненою областю напівпровідника і шаром діелектрика. Падіння напруги на шарі діелектрика, що визначає величину корисного тунельного струму електронів, задається (при помірному легуванні напівпровідника) поверхневою щільністю неосновних носіїв в інверсійному шарі (дірок - в разі напівпровідника n-типу). У свою чергу стаціонарна поверхнева щільність дірок встановлюється такою, щоб мав місце баланс між каналами їх генерації і каналами їх втрат (тунельний витік через діелектрик, дифузія в обсяг напівпровідника з інверсійного шару при малої напрузі на структурі і рекомбінація з електронами, тунелюють через діелектрик). Змінюючи інтенсивність освітлення МДН структури, ми змінюємо струм фотогенерації J_{ph} . Це призводить до зміни стаціонарної концентрації дірок в інверсійному шарі,

зміни падіння напруги на діелектрику i , відповідно, до зміни тунельного струму електронів J_e .

Таким чином, якщо при певній напрузі, що падає на діелектрик, тунельний струм електронів істотно більше, ніж дірок, то малі зміни струму J_{ph} можуть в принципі приводити до великих змін струму J_e , що і означає посилення. При цьому в транзисторній термінології затвор МДН структури виконує роль емітера електронів, інверсійний шар – роль індукованої світлом р-бази, а збіднена область напівпровідника – роль колектора електронів, "інжектованих" з емітера. Оскільки через вельми малого часу прольоту через тонку індуковану базу рекомбінацією в ній можна знехтувати, при досить ефективному емітері посилення в такому транзисторі може бути дуже великим.

Відзначимо, що вольт-амперні характеристики МН структур мають сублінійний характер у всьому діапазоні напруг, а при нульовому зміщенні є досить великий фототок короткого замикання. При цьому важливо те, що насичений ток в МОН структурах в 3..7 разів перевищує відповідні величини струмів в МН структурах, що можна інтерпретувати як посилення струму фотогенерації.

При напруженнях на структурі, менших порогової (коли ще немає сильної інверсії), падіння напруги на діелектрику мале, струм через структуру малий (інжекція електронів з напівпровідника в метал відсутня), а прикладена напруга падає на області просторового заряду. При подачі напруги вище порогового, відповідної сильної інверсії (струм фотогенерації повинен бути досить великим), з'являється тунельний струм електронів, який різко зростає зі збільшенням напруги зміщення за рахунок того, що значна частина приросту напруги зміщення падає на діелектрик. При цьому одночасно зменшується дифузійний потік дірок від поверхні в обсяг напівпровідника.

Зростання струму через структуру відбувається до тих пір, поки дифузний струм дірок не зменшиться до нуля і не встановиться баланс між збільшованою з напругою витоком дірок через діелектрик і темпом їх фотогенерації в збідненої області. Далі поверхнева концентрація дірок в інверсійному шарі перестає залежати від напруги зсуву, приріст якого майже цілком падає в напівпровіднику; при цьому струм через структуру стабілізується (його величина пропорційна току фотогенерації).

Існують різні модельні уявлення, що описують захоплення носіїв позитивного і негативного зарядів. У процесі транспорту електронів через діелектричну плівку в сильних електричних полях зростає їхня енергія, що в свою чергу призводить до появи гарячих електронів на хвості розподілу. Подальша термалізація гарячих електронів є основним механізмом, що призводить до виникнення дірок і часткового їх захоплення в діелектрику і / або на кордоні розділу з напівпровідником. В даний час основними ефектами, що приводять до виникнення дірок в підзатворному діелектрику МДН-структур при сильнополевій інжекції електронів, прийнято вважати міжзонну ударну іонізацію в діелектрику (для товстих плівок, що мають товщину більше 30 нм, Рис (А) і інжекції дірок з анода (для тонких плівок, що мають товщину менш 30 нм Рис (b) (рис. 9).

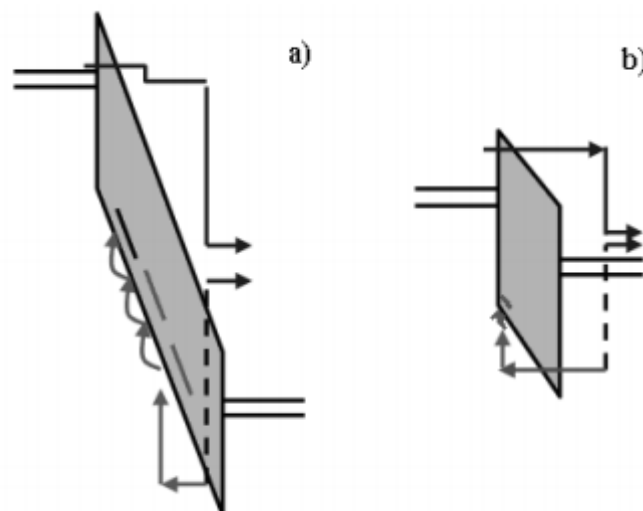


Рисунок 9 – Схематичне зображення зонних діаграм МДН-структур, ілюструє процес міжзонної ударної іонізації для товстих діелектричних плівок (а) і процес інжекції дірок з анода для тонких діелектричних плівок (б)

Для опису механізмів утворення позитивного заряду в підзатворному діелектрику МДН-структур при сильнополевій інжекції електронів також часто використовують модель звільнення водню на аноді (рис. 10) (Anode Hydrogen Release Model - AHR). У цій моделі електрони, інжектвані в анод з достатньою енергією, взаємодіють з іонами водню, локалізованими на межі поділу кремній (анод) - діелектрик, звільняючи частину з них. Іони водню (протони) проходять через окисел під впливом електричного поля, створюючи при цьому зарядові пастки. З літератури відомо, що водень бере участь в процесі генерації дефектів. Наприклад, опромінення протонами, навіть у відсутності поля, призводить до генерації дефектів. Деградація МДН-приладів при впливі гарячих електронів відбувається внаслідок створення цими електронами пасток на межі поділу Si-SiO₂, що порушують Si-H зв'язку. Водень може створювати пастки в обсязі підзатворного діелектрика. У переважній більшості інтегральних мікросхем і напівпровідникових приладів з МДН-структурою і проектними нормами більше 45 нм в якості підзатворного діелектрика продовжують використовуватися плівки на основі діоксиду кремнію. Модифікація таких діелектричних плівок шляхом легування або введення інших елементів під час окислення є одним з основних напрямів поліпшення характеристик МДН-приладів. В цьому зв'язку, для виготовлення підзатворних діелектриків широко використовуються плівки оксинитрида кремнію (SiO_xN_y) і плівки SiO₂, леговані фосфором або бором. При легуванні плівки SiO₂ фосфором або бором атоми домішки можуть заміщати атом кремнію в тетраедрі SiO₂ з утворенням плівки фосфорно-силікатного (ФСС) або боро-силікатного скла (БСС), відповідно. Формування тонкої плівки ФСС з малої (не більше 1,2%)

концентрацією атомів фосфору, за рахунок легування поверхні плівки SiO_2 , може суттєво змінити характеристики подзатворного діелектрика. У МДН-структурах з підзатворним діелектриком SiO_2 -ФСС при сильнополевій тунельній інжекції частина інжектованих електронів захоплюється на електронні пастки, пов'язані з плівкою ФСС.

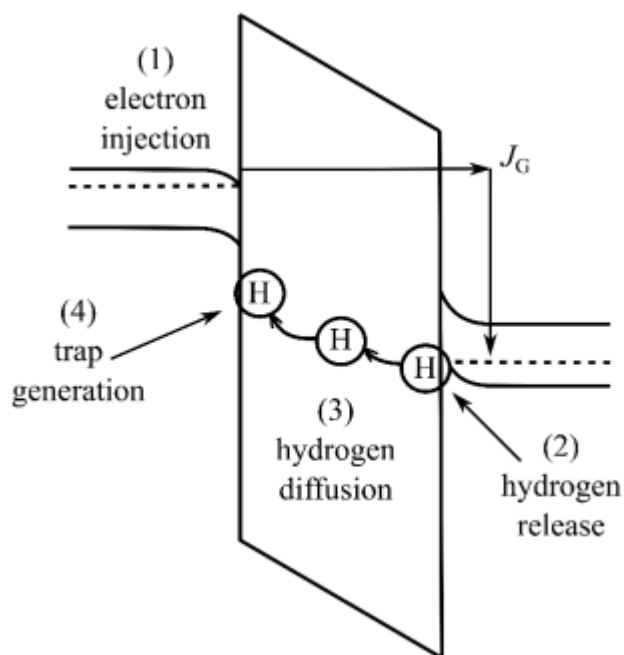


Рис. 10. Схематичне зображення зонної діаграми МДН-структури, ілюструє модель звільнення водню на аноді: 1 - інжекція електронів; 2 - звільнення водню в результаті термалізації гарячого електрона; 3 - переміщення водню через подзатворний діелектрик; 4 - генерація воднем пасток заряду

Поява таких пасток може бути обумовлено позитивно зарядженими групами, утвореними атомами фосфору при вплавленні P_2O_5 в тетраedr SiO_2 і / або впливом полярних молекул PCl_3 або POCl_3 на SiO_2 при формуванні ФСС, що в свою чергу може призводити до розриву хімічних зв'язків між тетраедрами. Останнім часом підзатворний діелектрик на основі плівки SiO_2 , пасивувати тонкою плівкою ФСС, також широко використовується в польових приладах на основі карбіду кремнію (SiC). Формування плівки ФСС в таких приладах дозволяє істотно поліпшити їх характеристики,

зокрема, за рахунок зменшення щільності поверхневих пасток на межі поділу 4H-SiC / SiO₂.

6. ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ HIGH-K ДІЕЛЕКТРИКІВ

High-k діелектрики - це діелектричні матеріали, що мають високе значення відносної діелектричної проникності k (або ϵ). Значення для різних high-k діелектричних матеріалів може варіюватися в досить в широких межах. Для найбільш часто досліджуваних high-k діелектриків, таких як, наприклад, Ta_2O_5 , HfO_2 , Al_2O_3 , значення відносної діелектричної проникності лежить, як правило, в рамках $\epsilon = 10 \div 80$.

У літературі часто розглядають high-k діелектрики в сукупності з інтерфейсним шаром, роль якого, наприклад, може грати шар SiO_2 (т.зв. діелектричні стеки - dielectric stack), проте це залежить від технології отримання плівок high-k діелектриків. Природа походження інтерфейсного шару, що знаходиться між high-k діелектриком і електродом, грає важливу роль у визначенні того, чи підходить даний high-k матеріал для конкретного додатка. У деяких випадках інтерфейсні шари створюються навмисно для того, щоб пасивувати поверхню, запобігти дифузії або підвищити адгезію. Однак, більшість інтерфейсних шарів формуються випадковим чином і чинять негативний вплив на характеристики напівпровідникових приладів, складником яких вони є.

Інтерфейсні шари можуть кілька зменшувати ємність шару high-k діелектрика. Оксидні інтерфейсні шари можуть бути сформовані при наступних хімічних реакціях підкладки: (I) при реакції з прекурсорами, використовуваними для створення плівки high-k діелектрика; (II) при реакції з киснем, що знаходиться безпосередньо в плівці high-k діелектрика; (III) при реакції з домішками кисню, які проникають через плівку high-k діелектрика. Хоча деякі high-k матеріали повинні бути стабільними при контакті з кремнієм, все ж в більшості випадків при осадженні таких матеріалів має

місце бути нерівноважний стан. Найчастіше на кремнієвій підкладці в якості інтерфейсного шару формується або шар SiO_2 , або кремнієва / high-k суміш.

Незалежно від того, який інтерфейсний шар був сформований, загальна електрична ємність стека інтерфейсний шар / high-k діелектрик буде менше, ніж ємність high-k плівки самої по собі. Ємність двох конденсаторів (1 і 2), включених послідовно, визначається наступною формулою:

$$1 / C_{total} = 1 / C_1 + 1 / C_2$$

Ємність конденсатора обчислюється як $C = \epsilon \epsilon_0 S / d$, де S - площа конденсатора, d - товщина діелектричної плівки. Для визначення ефекту зменшення ємності конденсатора з діелектричним стеком в порівнянні з конденсатором з одиночним діелектричним шаром вводять поняття еквівалентної товщини оксиду (EOT - Equivalent Oxide Thickness). EOT вдає із себе товщину плівки SiO_2 з відносною діелектричною проникністю $\epsilon = 3,9$, яка пропорційна ємності конденсатора з high-k діелектриком. Загальна еквівалентна товщина стека визначається наступною формулою:

$$EOT = \epsilon(\text{SiO}_2) / \epsilon(\text{high-k}) \cdot d(\text{high-k}) + d(\text{SiO}_2)$$

7. ЗАРЯДОВІ ЯВИЩА В HIGH-K ДІЕЛЕКТРИКАХ НА ПРИКЛАДІ ДІЕЛЕКТРИЧНОГО СТЕКА ДІОКСИД КРЕМНІЮ – ДІОКСИХ ГАФНІЮ

Як вже було зазначено, в переважній більшості випадків при формуванні high-k діелектриків також має місце бути плівка діоксиду кремнію, внаслідок чого утворюється діелектричний стек $\text{SiO}_2/\text{high-k}$ діелектрик (рис. 11). Тому в літературі при розгляді механізмів протікання зарядових явищ в тому чи іншому high-k діелектрику зазвичай розглядають зарядові явища в діелектричному стеці $\text{SiO}_2/\text{high-k}$ діелектрик. при додатку до структури метал-діелектрик-напівпровідник, що містить діелектричний стек $\text{SiO}_2 / \text{HfO}_2$, впливу, наприклад, постійної напруги певної амплітуди, що приводить до виникнення інжекції носіїв заряду в діелектричний стек, можуть спостерігатися такі нижченаведені процеси:

1) Захоплення заряду на пастки. При спробі знаходження причин зсуву порогового напруги МДН транзистора з підзатворним діелектриком $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ була запропонована модель захоплення заряду в діелектричному стеці, яка полягає в тому, що зона, яка містить дефекти в плівці HfO_2 , енергетично знаходиться в забороненій зоні діоксиду гафнію між рівнем Фермі кремнію і дном зони провідності HfO_2

Перевага даної моделі полягає в тому, що вона якісно пояснює процеси захоплення інжектуємого заряду і його вивільнення з дефектів за допомогою тунелювання носіїв заряду через інтерфейсний шар SiO_2 . Також існує модель для МДН-структури з діелектричним стеком $\text{HfO}_2 / \text{SiO}_2$ (рис. 12), що припускає що причиною зсуву порогового напруги МДН транзисторів є дефекти, розташовані так, як це показано на Рис 12

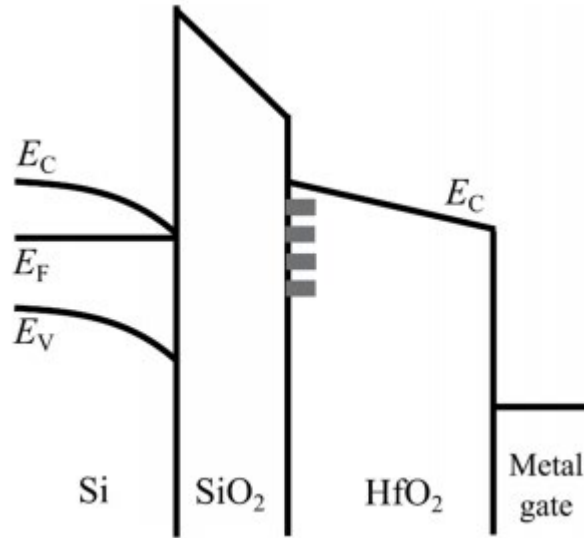


Рисунок 11 – Схематичне зображення енергетичної зонної діаграми МДН-структури з діелектричним стеком $\text{SiO}_2 / \text{HfO}_2$, яка б показала розподіл дефектів (зарядових пасток) для моделі, яка передбачає, що дефектна область розташовується між рівнем Фермі Si і дном зони провідності HfO_2

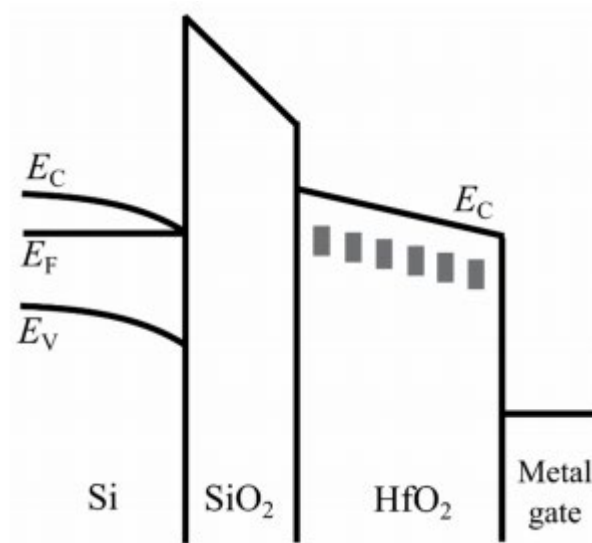
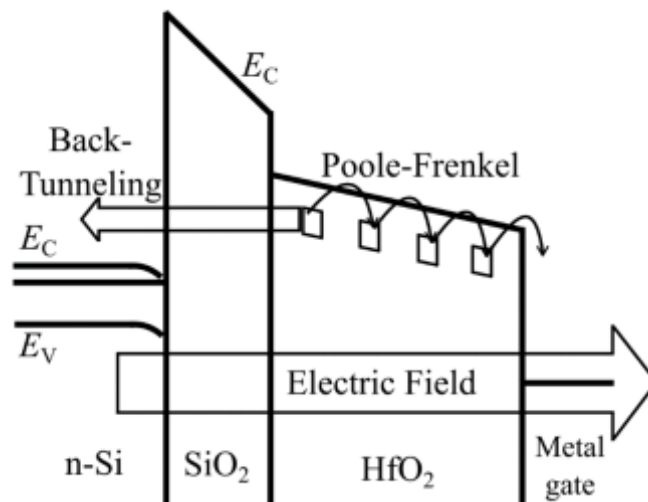


Рисунок 12 – Схематичне зображення енергетичної зонної діаграми МДН-структури з діелектричним стеком $\text{SiO}_2 / \text{HfO}_2$, яка б показала розподіл дефектів (Зарядових пасток) для моделі, описує причину зсуву порогового напруги МДН транзисторів з подзатворного діелектриком $\text{SiO}_2 / \text{HfO}_2$

Однак, основною проблемою для надійності плівки high-k діелектрика є заряд, що накопичується в обсязі плівки high-k діелектрика, а також на кордоні розділу інтерфейсний діелектрик - high-k діелектрик ($\text{SiO}_2 / \text{HfO}_2$).

Для того, щоб охарактеризувати вищевказаний заряд, досліджувалися, наприклад, МДН-структури, що містять high-k діелектричну плівку різної товщини. Результати таких досліджень показали, що захоплення носіїв заряду при їх інжекції в діелектрик відбувається переважно в обсязі high-k діелектричного шару стека $\text{SiO}_2 / \text{HfO}_2$, на відміну від кордону розділу. Це впливало з того, що при використанні більш тонкої плівки high-k діелектрика захоплюється меншу кількість заряду. Дослідження показують, що більшість електронів захоплюються із зони провідності діоксиду гафнію. Дослідження також говорять про те, що кінетика захоплення заряду в діелектричній плівці може бути описана з використанням статистики Шоклі-Ріда-Холла.

2) Звільнення захопленого на пастки заряду. В літературі повідомляється, що при додатку негативного постійної напруги достатньої величини до затвору МДН-структури з двошаровим діелектриком $\text{SiO}_2 / \text{HfO}_2$, що має захоплений на пастки в діелектричній плівці заряд (В разі, якщо затвором є Si підкладка n-типу) (рис. 13), може статися повне вивільнення захопленого заряду. Однак, навіть при зворотній полярності напруги (позитивної по відношенню до затвору), відбувається часткове звільнення заряду. Дане вивільнення може відбуватися внаслідок двох можливих механізмів звільнення захопленого заряду. Перший з них полягає в тунелюванні електронів з пасток в напівпровідникову підкладку (зворотне тунелювання - back-tunneling), в той час як другий вдає із себе перехід електронів по пасток внаслідок ефекту Пула-Френкеля аж до металевого електрода рис. 13.



Рисисунок 13 – Схематичне зображення зонної діаграми структури n-Si / SiO₂ / HfO₂ / MG в умовах прикладеного до напівпровідникової n-Si підкладці позитивного постійної напруги, ілюструє два механізми звільнення заряду з пасток: зворотне тунелювання і перенесення заряду по Пулу-Френкелю

Крім вищевказаних зарядових явищ в діелектричних стеках з high-k діелектриком при сильнополевому впливі також може спостерігатися створення нових електронних пасток (дефектів), що може призводити до додаткових зарядових ефектів. Крім того, необхідно відзначити, що згідно з рядом досліджень, спостерігається досить сильна залежність зарядових явищ в МДН-структурі з діелектричним стеком з high-k діелектриком від температури навколишнього середовища - з підвищенням температури протікання зарядових процесів істотно прискорюється.

8. ТУНЕЛЬНО-ТОНКИЙ ДІЕЛЕКТРИК SiO_2

Попередник поточних штампів high-k є тонким (скажімо, 4 нм товщиною) сухим термічний (тобто вирощений високотемпературним термічним окисленням субстрату Si) SiO_2 діелектрик з одним затвором (Сухий тепловий SiO_2 - справжній діелектрик в тому сенсі, що всередині його основної маси немає зарядів, і це може бути представлено діелектриком ємність єдина.) та MOS / MIS (напівпровідник металевого оксиду / ізолятора) тунельна структура на не виродженому кремнію. Пітер Грей був одним із найбільш ранніх слідчі вивчили ці тунельні споруди в 1965 році (відповідно до його керівництва Джон Бардін зацікавлений у станах поверхні / інтерфейсу, бар'єрі Шоткі та тунелювання). Вагомий базовий аналіз тунельних конструкцій MOS / MIS був проведений, серед інших, Кар і Далке, Карт та Родерік, та Грін і Шечун, близько 40 років тому. (Ці основи будуть застосовні до всіх діелектриків воріт, включаючи матеріали з високим рівнем k.) Однак переважаюча мудрість спільноти мікроелектроніки в той час, і на довгий час, полягала в тому, що просочені (скажімо, щільність струму $>1 \cdot 10^{-9}$ А см-2) тунельних оксидів ніколи не побачать світла дня, коли мова зайшла про їх промислове застосування як діелектрик із затворним ефектом додаткового каналу MOS Field Effect (CMOSFET). Експериментальне дослідження Si / 2–4 нм SiO_2 / металевих конструкцій Кар та Дальке [2–4] внесло наступний основний внесок:

1. Було розроблено еквівалентне представлення ланцюга (див. рис. 14) тунельних структур MOS / MIS, на основі якого була окреслена методика прийому MOS для вилучення електронних параметрів цих тунельних структур, включаючи всі параметри інтерфейсної ловушки, з малого сигналу вимірювання ємності та електропровідності. Результати експериментів Кар і Дальке

підтвердив, що провідність постійного струму (постійного струму) можна легко і правильно відокремити від провідності пастки, використовуючи принцип суперпозиції; це було вирішальним питанням у розробці методики прийому тунелів MOS. Цей внесок (еквівалентна схема та техніка прийому в тунель) був основою всіх минулих та поточних методологій вилучення параметрів (техніка електропровідності, техніка малої ємності та ін.), в яких використовуються вимірювані малоприняті характеристики прийому сигналу. ($C - V - f$, $G - V - f$, $I - V$) ультратонких затворів. (C - щільність ємності, G - щільність провідності, I струм, V застосовується зміщення, а f - частота.)

2. Можливо, вперше Кар та Далке експериментально підтвердили, що домішкові елементи на інтерфейсі можуть генерувати характерні пастки (табл. 3).
3. Експериментальні результати Кар та Дальке показали, що в конфігурації MOS, якщо товщина шару SiO була менше приблизно 3,3 нм, але товща 1,3 нм, не утворювався сильний інверсійний шар, але зайнятість інтерфейсної пастки була як і раніше під контролем основного рівня носіїв Si більшості Fermi.

Табл. 3. Властивості пасток інтерфейсу, викликаних домішковими елементами в інтерфейсі або поблизу нього. За Кар і Дальке.

[https://www.researchgate.net/publication/283291425_High_Permittivity_Gate_Dielectric_Materials]

| Елемент | Енергія пастки над краєм валентної зони кремнію (eV) | Перетин захоплення (см ²) |
|------------|--|---|
| Магній, Mg | 0.54 | $1.1 \cdot 10^{-18}$ |
| Хром, Cr | 0.20-0.21 | $5.2 \cdot 10^{-17}$ - $1.1 \cdot 10^{-15}$ |
| | 0.52 | $6.6 \cdot 10^{-10}$ |

| | | |
|------------|-----------|---|
| Мідь, Cu | 0.20-0.26 | $1.1 \cdot 10^{-17} - 3.9 \cdot 10^{-16}$ |
| Золото, Au | 0.97 | $2.2 \cdot 10^{-16}$ |

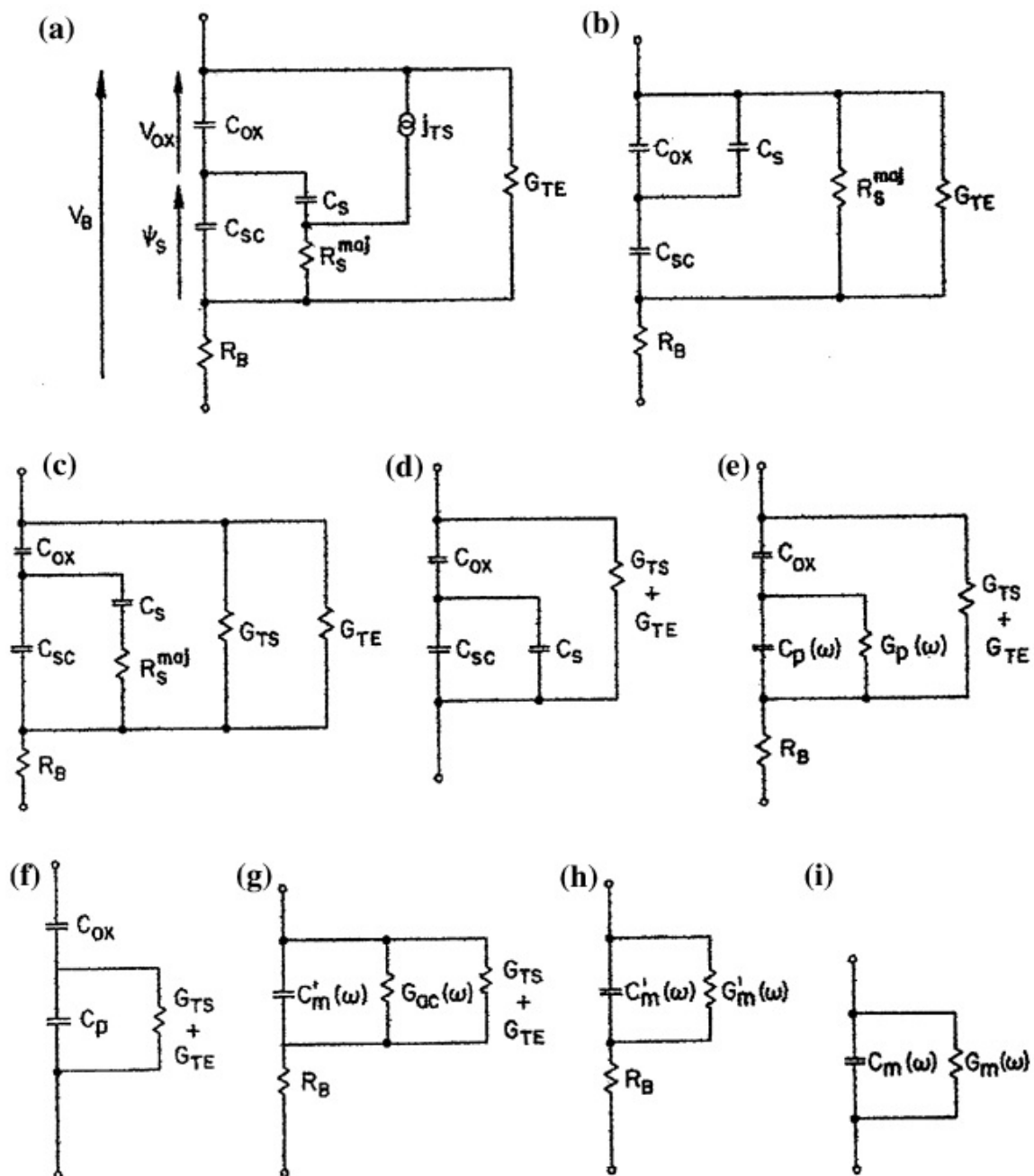


Рис. 14. Еквівалентні схеми для проміжної структури MOS δ 20 А° t_{ox} 40 А°Ф.

Мабуть, найважливіший внесок, який зробили Карт та Родерік в основи тунельних конструкцій Si/SiO₂/метал являло собою просту і елегантну форму щільності прямого тунельного струму через діелектрик тонких затворів, JDT.

Карт та Родерік правильно визнали, що в структурах класу пристрою домінуючим процесом транспортування несучої через комбінований потенційний бар'єр, що проходить над шаром заряду кремнію та ізолятором SiO₂, буде термальне (Шоткі) випромінювання через кремнієвий бар'єр з подальшим прямим тунелюванням через зазор SiO₂, тобто термоемісійний струм випромінювання може бути помножений на коефіцієнт пропускання тунелю $\exp - (Pm^{1/2})t_{ox}$, щоб отримати не просто замкнуту форму, а й простий математичний вираз для щільності прямого тунельного струму. У пристрої з високим рівнем k зарядного пристрою, особливо в режимі низької напруги затвора, домінуючий струм витоку затвора також може бути прямим тунельним струмом. Для ультратонких стеків з high- k затворного формулювання Card Rhoderick було основою для всієї закритої форми (хоча і набагато складнішої та набагато менш елегантної), а також числових виразів для прямого тунельного струму через стек воріт.

Як діелектричний затвор, SiO₂ є майже ідеальним, тобто він має всі властивості, які потрібні в діелектрику затвора для CMOSFET, за винятком його дуже низької діелектричної сталої k . Його надзвичайно високий зазор і його відносно велика ефективна маса 1 Вступ до штампів із high- k затвора дозволило діелектричним шарам SiO₂ затвора тонким 1,3 нм компенсувати низьке значення його k . Цей тонкий шар SiO₂ міг отримати діелектрик воріт. Ще десять років тому бінарні високоокисні оксиди розпочали свою кар'єру з ряду слабких місць; вони включали поганий інтерфейс із кремнієм, температура кристалізації набагато нижча, ніж для активації імплантата, висока щільність струму витоку, порогова аномалія напруги, висока щільність заряду стека, легка дифузія кисню через стек затвора та деградація штабеля затвора. Багато з цих проблем з тих пір були вирішені, і сьогодні

висококласні штабелі з металевими електродами є набагато кращою партією, яка знайшла роботу в технологіях вузлів 45, 32 та 22 нм. Проблема інтерфейсу з кремнію була вирішена шляхом введення проміжного шару на основі Si між Si та насипним шаром високої k. Фазова стабільність та проблема низької кристалізації вирішуються легуванням відповідними оксидами, тоді як легке дифузію кисню та домішок зменшується введенням азоту. Тепер можна налаштувати порогову напругу за допомогою декількох варіантів, таких як маніпуляція інтерфейсним диполем або кисневі вакансії; однак повний контроль порогової напруги все ще ухиляється. Щільність струму витоку затвора була знижена до задовільних рівнів. Щільність заряду штабелю затвора все ще дуже висока, і деградація штабеля затвора все ще недостатньо зрозуміла. Багато ще належить зробити в районі каналів підвищеної мобільності. Пасивація поверхні Ge досягла значних успіхів; пасивація деяких сполук напівпровідників III-V також досягла успіху, але проблема досі не вирішена задовільно. ЕОТ 0,5 нм виглядає досяжною ціллю для CMOSFET з високими k / г металевим затвором.

9. КОРЕЛЯЦІЯ МІЖ HIGH-K МАТЕРІАЛЬНИМИ КОНСТАНТАМИ

Між важливими константами матеріалів високооксидних оксидів можуть існувати взаємозв'язки. Як приклад, співвідношення між діелектричною постійною тактовою частотою, k_{c-f} та іншими матеріальними константами. Вклад електронної поляризації в діелектричну постійну k_{e-l} повинен бути n^2 , де n - показник заломлення, вимірюваний на оптичних частотах. (У Si та алмазі $k_{static} = n^2$. Підтвердження, що в цих твердих речовинах, крім електронних, немає поляризації.) Електронна поляризація та кель можна очікувати збільшення з атомним числом, тобто з числом електронів. Можливо, існує кореляція між проміжком смуги та келем, як це підказує правило Мосса $\{E_G(k_{e-l})^2 \sim 77\}$, хоча кількісне відношення цього емпіричного правила, як видається, не застосовується повсюдно. Якісно можна стверджувати, що великі катіони призводять до великих міжіонних відстаней, до слабших зв'язків і, отже, до менших проміжків смуг. Великі проміжки діапазону сумісні з малими спорідненостями до електронів, як і більша іонна здатність змішаного зв'язку з більшим координаційним числом катіонів. Можна очікувати, що більша йонність і більша кількість координаційних катіонів / аніонів призведе до більш високої іонної поляризації та кіону.

10.MOSFET: ОСНОВИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ

Структура MOS, що є керуючим електродом, є найважливішою складовою MOSFET, включаючи її діаграми енергетичного діапазону, електростатичний аналіз, плоскі і порогові напруги, подання ланцюга та характеристики ємності та напруги (C – V).

Спочатку мали справу з діелектриком з одним затвором - непротікаючим SiO₂ -, згодом він закінчився герметичним, надтонким стековим high-k. Що стосується структури MOS, то операція MOSFET, включаючи її характеристики каналу (струм витоку, провідність каналу, надпровідність), була проаналізована спочатку для діелектрика одного затвора SiO₂. Значний прогрес був досягнутий у розумінні багатьох аспектів штабелів з high-k, зокрема, його осадження, включаючи попередники, обробку після осадження, пасивацію поверхні кремнієвого каналу, формування проміжного шару якості пристрою та теплову та хімічну стабільність high-k. На жаль, електричні характеристики штабелі з high-k - електрично активні дефекти та кисневі вакансії, фіксовані заряди, пастки інтерфейсу, об'ємні пастки та інтерфейсні диполі, деградація штабеля воріт - наразі є однією з менш зрозумілих тем. Визначаючи характеристику каналу штабелів high-k, метою було виділити деградацію струму витоку, провідності каналу та надпровідності неідеальними факторами, присутніми у MOSFETS high-k, а саме - затвори штабельні заряди, робота функціонує аномально та ненасичуюче поверхневий потенціал.

Діаграма енергетичного діапазону через стековий high-k, характер і походження дефектів, пасток і зарядів у стековому high-k, електростатичний аналіз (заряди та відповідні потенціали, ємність і провідність ловушки) та подання ланцюга - з цими предметами не тільки складно розібратися, але й перешкоджають наші неповні знання про розташування, величину та фізичні

властивості великої різноманітності дефектів, пасток та зарядів з високим рівнем k . Щоб проаналізувати внесок електрично активних дефектів та пасток у заряди, потенціали та ємність та провідність штабеля, необхідно знати вміст цих дефектів Фермі, який потребував обробки тем проникнення електронно-хвильової функції в стековий high- k , квантово-механічне тунелювання та константа часу пастки.

11. ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ГАФНІЮ

Matsushita та Intel почали масово виробляти чіпи 45 нм наприкінці 2007 року, а AMD розпочав виробництво чіпів 45 нм наприкінці 2008 року, тоді як IBM, Infineon, Samsung і Chartered Semiconductor незабаром після цього виконали загальну 45 нм технологічну платформу. На кінець 2008 року SMIC стала першою напівпровідниковою компанією в Китаї, яка перейшла на 45 нм, отримавши ліцензію на основний 45 нм процес від IBM.

Спочатку виробники мікросхем висловлювали занепокоєння щодо впровадження нових матеріалів з high-k у колоду з метою зменшення щільності струму витoku воріт. Однак і IBM, і Intel оголосили, що мають high-k діелектрик з рішеннями з металевих затворів, що Intel вважало принциповою зміною конструкції транзисторів. У випадку технологічного вузла Intel 45 нм (відноситься до мінімальної довжини функції - як правило, середня половина кроку осередку пам'яті), 1 нм була еквівалентною товщиною оксиду (EOT) з перехідним шаром 0,7 нм, довжина затвора становила 35 нм, останній затворний процес був використаний з напругами $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$; 1,36 та 1,07 мА / μm були струмами приводу nFET та pFET відповідно. Першим у світі високоякісним матеріалом у комерційному виробництві був матеріал на основі гафнію - певна форма HfSiON . 32 нм технологія була впроваджена у виробництво Intel та AMD на початку 2010 року; в той час як в 2012 році був введений 22-нм технологічний вузол, в якому довжина затвора MOSFET може бути приблизно 25 нм, а значення EOT може бути приблизно 0,5 нм.

Основна перевага гафнія полягає в його поєднанні високої діелектричної постійної з високою зміною зони провідності та валентності. До серйозних недоліків гафнія можна віднести значну константу дифузії кисню, а також

атомів допантів / домішок, помірну температуру кристалізації та утворення силіциду.

Дифузія кисню через гафній до поверхні кремнію призводить до загущення проміжної плівки кремнезему із супутнім збільшенням ЕОТ. Дифузія атомів допанта або домішок через гафнію до поверхні Si та каналу може дестабілізувати порогову напругу та / або створити стан інтерфейсу. Полікристалізація гафнія під час відпалу активації легуючої речовини збільшує струм витоку затвора. Утворення силіциду також збільшить струм витоку воріт. Нітридація HfO_2 , що призводить до утворення HfON , може запобігати дифузії кисню, легуючих речовин та домішок; однак пробіл у смугах значно зменшується. Твердий розчин гафнія з діоксидом кремнію або глиноземом, що призводить до утворення силікату Hf або Hf алюмінату, спостерігається для придушення кристалізації, оскільки силікат Hf або алюмінат мають більш високу температуру кристалізації. Також пригнічується утворення силіцидів. Однак спостерігався поділ фаз у сплавах HfSiO та HfAlO (з появою кристалітів HfO_2) при високих температурах обробки, які можна запобігти включенню азоту в HfSiO або HfAlO . Інкорпорація також виявляє, що посилює діелектричну константу і ефективно блокує дифузію атомів кисню, легуючих речовин та домішок.

Важливим параметром у зв'язку з електричною поляризацією є частота діелектричної релаксації, що залежить від інших факторів від маси заряду заряду. Електрони мають значно меншу масу, отже, електронна поляризація може слідувати за дуже високими частотами; частота релаксації в цьому випадку знаходиться в межах видимого діапазону, тобто близько 10^{15} – 10^{16} Гц. Маса збільшується, переходячи від іонів до молекулярних диполей до дефектних комплексів і до інтерфейсів; отже, відповідні частоти релаксації: для іонної поляризації в інфрачервоному діапазоні — 10^{11} – 10^{13} Гц, для дипольної поляризації в діапазоні 10^6 – 10^8 Гц, для поляризації дефектів в діапазоні 10^3 – 10^5 Гц і для міжфазної поляризації в діапазоні 10^{-2} – 10^3 Гц. Як

правило, в даному матеріалі буде присутня лише декілька можливих поляризацій. У матеріалі, в якому присутні кілька поляризацій, проникність матиме своє найвище значення при статичній, тобто дуже низькій частоті (статична проникність). При заданій змінній частоті тільки ті поляризації сприятимуть загальній діелектричній постійній, частоти релаксації якої перевищують частоту змінного струму. Отже, пропускна здатність дорівнює нулю для всіх матеріалів вище видимого діапазону. На робочій частоті (тобто деякій ГГц) для MOSFET мають значення лише електронна та іонна поляризація.

Електронна поляризація, яка, як правило, зростає з атомним числом, мала навіть для важких оксидів з високим рівнем k . Отже, іонна поляризація є головним джерелом проникності для стекових high- k затворів. Важливою темою є втрати діелектрика. Пропускна здатність або діелектрична константа має реальну та уявну складову, що представляє собою здатну та резистивну частину або частину втрат. Уявна складова проникності проходить через пік навколо кожної частоти релаксації; на інших частотах його значення дорівнює нулю. На жаль, існує кілька хибних уявлень про діелектричну константу. Багато хто плутає діелектричну константу, що не є одиницею, з проникністю (одиниця - $F\text{ см}^{-1}$) і вживають фразу "відносна діелектрична константа"; діелектрична константа сама по собі є відносною проникністю; тому слово "відносний" у фразі "відносна діелектрична константа" є зайвим. Іноді посилаються на діелектричну константу або проникність у нескінченності, можливо, не усвідомлюючи, що обидва з них дорівнюють нулю вище оптичних частот. Третє питання, що викликає занепокоєння, полягає в тому, що для MOSFET є важливим значення діелектричної постійної на частотах ГГц. Експериментальне значення діелектричної константи рідко добувається на частотах ГГц; майже завжди його оцінюють за допомогою вимірювань на рівні 1 МГц або нижче, на частоті яких декілька поляризацій, наприклад дипольна та дефектна поляризація, в деяких

випадках, можуть набувати значення діелектричної постійної значно вище її значення на частотах ГГц.

12. КОНТАКТ МЕТАЛ-НАПІВПРОВІДНИК (БАР'ЄР ШОТКІ)

Можна вважати контакт (або з'єднання) метал-напівпровідник підкласом структури MOS / MIS, де товщина оксиду / ізолятора дорівнює нулю. Цей пристрій широко відомий як бар'єр або діод або контакт Шоткі, названий на честь Вальтера Германа Шоткі, який зробив важливий внесок у розвиток його теорії, зокрема, зменшення бар'єру сили зображення. Сам діод Шоткі є важливим напівпровідниковим пристроєм; крім того, це важливий компонент транзистора Шоткі (біполярний перехідний транзистор із бар'єром Шоткі між базою та колектором), металевий напівпровідник FET (MESFET, в якому керуючий електрод - контакт MS), транзистор високої мобільності електронів (HEMT) і бар'єрний транзистор вуглецевої нанотрубки (TBH) Шоткі. MESFET і HEMT були заміниками конфігурації MOSFET / MISFET на складених напівпровідниках, як раніше, так і сьогодні важко реалізувати високоякісні конфігурації MOSFET / MISFET на складених напівпровідникових підкладках.

У нас є більш пряма причина для розгляду та аналізу формування бар'єру Шоткі та його основного характеру. Контакт MS є обмежувальним випадком структури MOS. Ультратонкий стек MOS-затворів із EOT менше 1,0 нм та зменшенням до EOT 0,5 нм набагато ближче до контакту MS, ніж до класичної структури MOS. Отже, розуміння контакту MS корисно для аналізу надтонкого стека MOSFET.

Багато контактів MS можуть мати міжфазний шар (скажімо, до товщини до нм) між напівпровідником і металом; однак, можливо, уникнути міжфазного шару, як при контакті MS кремній / силіцид. Коли між напівпровідником і металом встановлено інтимний контакт, між цими двома шарами повинен відбутися обмін електронами або дірками для вирівнювання енергії та рівня Фермі (те, що ми називаємо рівнем Фермі у фізиці

напівпровідників, - це насправді хімічний потенціал. різів рівень Фермі плутають з енергією Фермі. Енергія Фермі визначається лише при абсолютному нулі — 0 K; це енергія електрона з найвищою енергією при 0 K).

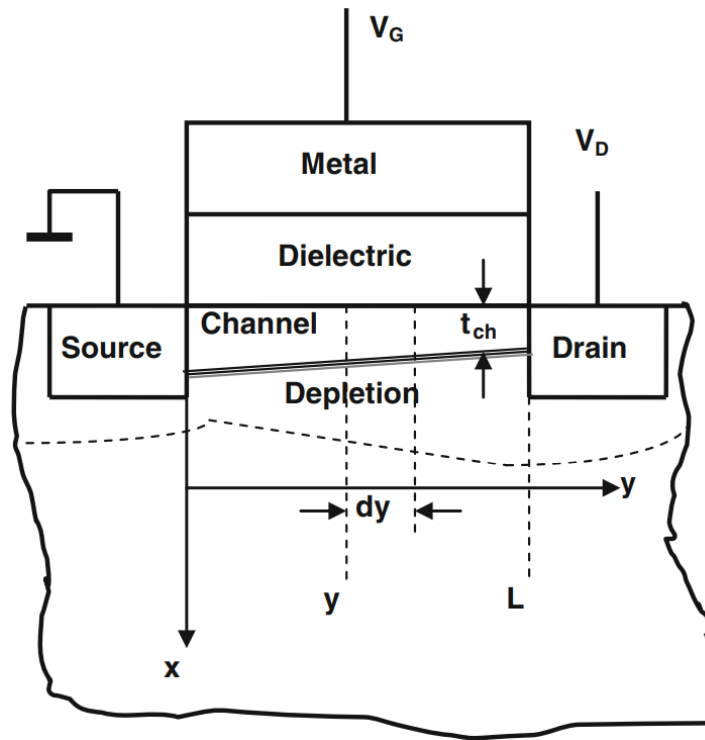


Рисунок 15 – Ідеальне представлення основних особливостей структури MOSFET. Фізичні розміри непропорційні, щоб дозволити наголосити на таких елементах MOSFET, як канал і діелектрик затвора, які в значній мірі диктують продуктивність MOSFET. Також контури таких елементів, як канал і шар виснаження, є лише показовими. Це представлення передбачає, що напруга зливу V_D менша за напругу затвора V_G

13. ІДЕАЛЬНИЙ MOSFET

13.1. Лінійний режим

Почнемо з дуже простого одновимірного аналізу, який дасть базове, але важливе розуміння пристрою. Охарактеризуємо також ідеальний стек MOSFET, за допомогою якого згодом ми зможемо порівняти MOSFET в реальності та проаналізувати деградацію параметрів каналу за допомогою неідеальних факторів. Далі наведено список неідеальних факторів, і ми вважаємо, що вони відсутні в ідеальному стеку MOSFET:

1. Нульові заряди будь-якого виду в об'ємному і інтерфейсі ізоляційного затвора;
2. Нульова різниця в роботі напівпровідників / металів;
3. Насичуючи поверхневий потенціал інверсії, тобто поверхневий потенціал залишається замороженим у своєму значенні при настанні режиму сильної інверсії і більше не змінюється з напругою затвора;
4. Низька напруга стоку порівняно з напругою затвора;
5. Заряд іонізованих допантів дорівнює нулю

Іншими словами, в ідеальному MOSFET вся напруга затвора (100% його) використовується при генерації заряду каналу Q_{ch} (що складається тільки з електронів у n каналі), і жоден з них не витрачається на неідеальні фактори. Струм витоку прямо пропорційний заряду каналу Q_{ch} ; якщо частини напруги на затворі витрачаються на неідеальні фактори і, отже, недоступні для генерування Q_{ch} , то струм витоку зменшується пропорційно - це призводить до деградації параметрів каналу неідеальними факторами.

В ідеальній MOSFET, під сильною інверсією, сток-канал-стік стає однорідним напівпровідником (без переходів), що дозволяє більшості носіїв

текти дрейфом; отже, струм витоку є просто напругою витоку, кратною за провідність каналу.

13.2. Класична модель

Тепер ми переходимо до вищого загального і трохи ідеального відношення $I_D(V_D)$, для якого тривалі три тривалості пропозиції. Щойно напруга витоку застосовується, рівномірність каналу зникає, тобто товщина каналу t_{ch} перетворюється на функцію напруги витоку, тобто канал більше не може бути представлений геометричною провідністю, а стає об'єктом, залежним від V_D . Це те, що робить відношення $I_D(V_D)$ нелінійним (Збільшення V_D порівняно з V_G , відношення $I_D(V_D)$ перетворюється з лінійного на нелінійне та, нарешті, на насичення.), Коли V_D стає значущим. Застосовуючи напругу стоку V_D , напруга вздовж напрямку y , $V(y)$, збільшується від нуля біля джерела ($y = 0$) до V_D на стоку ($y = L$). Отже, товщина каналу $t_{ch}(y)$ максимальна на джерелі і мінімальна на стоці. У будь-якій точці y напруга на ізоляторі затвора дорівнює $[V_G - \phi_s(y)]$. Коли $V_D = 0$, ϕ_s не є функцією y . Але для ненульового V_D ϕ_s - функція y така, що в будь-якій точці y , $\phi_s(y) = \phi_s(y = 0) + V(y)$, за рис. 15.

Можна відзначити, що при ненульовій напрузі зливу канал знаходиться в тепловій нерівновазі; отже, електронний імреф (тобто рівень квазі-Фермі) відокремлюється від квазі-шару Фермі (імреф), як проілюстровано на рис. 16. Після прикладання напруги зливу, напруга $V(y)$, еквівалентна енергія, $qV(y)$, в точці y в каналі, повинна з'являтися між більшою частиною несучої в нейтральній підкладці і більшою частиною носія в каналі, як показано на рис. 16. Для підтримання каналу та умови сильної інверсії в будь-якій точці y для підкладки p -Si край E_c провідності повинен підтримувати певну мінімальну енергію від електронного квазі-шару Фермі. Також поверхневий потенціал y

у для режиму сильної інверсії $\phi_{s,inv}(y)$ перевищить потенціал поверхні у джерела, $\phi_{s,inv}(y = 0)$ на $V(y)$:

$$\phi_s(y) = \phi_s(y = 0) + V(y).$$

Тому напруга через діелектрик затвора дорівнює:

$$V_{di} = [V_G - \phi_s(y = 0) - V(y)] = \frac{-Q_{sc}}{C_{di}}.$$

Іншими словами, напруга на діелектрику затвора є максимальним на джерелі та мінімальним на зливі, що призводить до максимального заряду каналу та ширини каналу на джерелі та мінімального заряду каналу та ширини каналу на зливі. Це робить канал негеометричним провідником, що вимагає формулювання співвідношення струм і напруга.

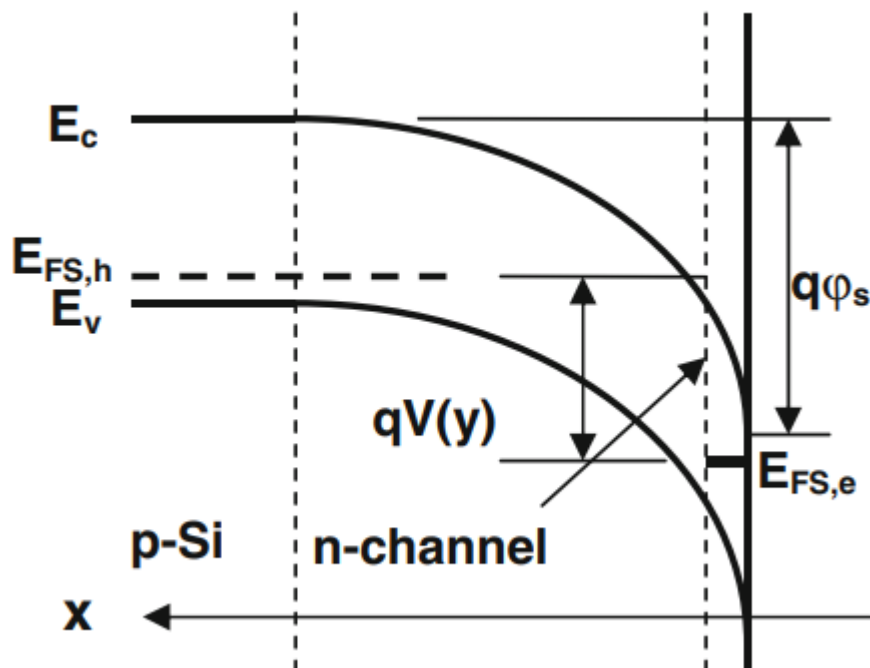


Рисунок 16 – Профіль енергетичного діапазону області заряду напівпровідникового простору вздовж осі x для напруги затвора V_G більша за порогову напруга V_T (канал існує

на напівпровідниково-діелектричному інтерфейсі), в точці y вздовж напрямку y (тобто напрям V_D) для ненульового V_D . $E_{FS,e}$ - дірка (мажоритарний носій) квазі-шару Фермі в нейтральній області p-Si, тоді як $E_{FS,e}$ - електронний імреф у каналі. Зауважимо, що електрони є носіями меншості в нейтральній області p-Si, але є мажоритарними носіями в каналі, тобто після інвертування p-Si субстрату

Коли напруга стоку V_D вже не є малим порівняно з напругою V_G , $V_D/2$, набирає вагу; отже, струм витоку швидко не збільшується при V_D , і починає стекти. Кронштейн, помножений на γ , є чистим позитивним і, в меншій мірі, також відповідає за струм витоку, що відхиляється від лінійного збільшення з напругою стоку i , нарешті, має тенденцію до насичення. Можна зазначити, що деривація заснована на припущенні, що канал існує у всій області між джерелом і стоком, і що носії проходять канал дрейфом. Зі збільшенням напруги зливу виникає ситуація, коли канал зникає на зливі ($y = L$). Ця умова відома як прищипка, яка виникає спочатку при зливі, а при подальшому збільшенні V_D точка відключення y_p рухається до джерела. Умова відключення може бути визначена як: $n_s = N_A$ (для напівпровідника типу p) або $Q_{ch} = 0$. Напруга витоку насичення, V_{DS} , - напруга стоку, для якої точка відключення $y_p = L$, і відповідна стіка струм - струм зливання насичення, I_{DS} .

ВИСНОВКИ

В ході дипломної роботи було проаналізовано технологію МДН структур та принцип їх роботи. А також було розглянуто діелектрики, які замінюють SiO_2 в МДН структурі завдяки своїм перевагам. Як діелектричний затвор, SiO_2 є майже ідеальним, тобто він має всі властивості, які потрібні в діелектрику затвора для CMOSFET, за винятком його дуже низької діелектричної постійної k . Але SiO_2 вже не використовують, тому що при переході до нано розмірів вони стають тунельно прозорими. Замість них запропоновано використовувати high- k діелектрики. Але щоб зменшити щільність поверхневих станів між напівпровідником та high- k діелектриком створюють тунельно-тонкий діелектрик і отримують так звану стекову структуру. High- k діелектрики - це діелектричні матеріали, що мають високе значення відносної діелектричної проникності k (або ϵ).

Сенс масштабування полягає у рівному зменшенні елементів, але при цьому дані не повинні бути змінені, тобто при зменшенні розмірів необхідно зберігати незмінним значення напруженості електричного поля в будь-якому елементі транзистора. Якщо зменшити довжину затвора в k разів і одночасно знизити робочу напругу в стільки ж разів, то час затримки логічного елемента скоротиться в k раз. При наближенні довжини каналу до розмірів менше мікрона виникли проблеми, що вимагають введення ряду додаткових технологічних операцій для того, щоб зменшення довжини каналу приносило бажаний результат. Наприклад, вже при $L_k \sim 45-65$ нм товщина підзатворного діелектрика досягає одиниць нанометрів, що призводить до занадто великих тунельних струмів витоку канал-затвор, що значно збільшує розсіювання потужності і зменшує крутизну вольтамперної характеристики транзистора. Цю проблему вирішили за допомогою заміни загальноприйнятого оксиду (або оксинитрида) кремнію high- k діелектриком.

Однак важливо пам'ятати, що під high-k діелектриком все ще знаходиться тонкий шар SiO_2 , що визначає параметри кордону розділу.

Поліпшення параметрів кремнієвої мікро- і наноелектроніки за рахунок зменшення розмірів, зміни конструкції і т. д. з початку XXI століття стало швидко просуватися до насичення. У той же час Ge привернув пильну увагу в як матеріал для створення транзистора з високою рухливістю носіїв заряду в каналі.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Марченко А. А. Основы электроники: Учебное пособие для вузов, 2009
2. Офіційний сайт Энциклопедия физики и техники [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://femto.com.ua>
3. Окснер Э.С. Мощные полевые транзисторы и их применение, 1985
4. Офіційний сайт Кафедра промышленной электроники ТУСУР [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://ie.tusur.ru/news.php>
5. Офіційний сайт Компоненты и технологии [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.kit-e.ru>
6. Офіційний сайт И. Г. Неизвестный ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/ccc/ccc924e0cb b854ad0a606b6f64320b5d.pdf>
7. Офіційний сайт Твердотельная электроника. Учебное пособие [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.chipinfo.ru/literature/books/solid_state_electronics/chapter6/part17.html
8. О.В.Борисов Твердотільна електроніка
9. Офіційний сайт Т. М. Борисова, Р. А. Кастро Исследование диэлектрических свойств тонких пленок оксида алюминия, выращенных методом молекулярного наслаивания [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://mipt.ru/dgap/upload/c40/Pages_from_21-24-arphd5m8frq.pdf
10. И.В. Грехов, М.И. Векслер, П.А. Иванов, Т.П. Самсонова, А.Ф. Шулекин Физика и техника полупроводников, 1998
11. Samares Kar High Permittivity Gate Dielectric Materials, 2013

12. Сайт Карелія (Мікромініатюризація МДН-пристроїв)
[Електронний ресурс] - Режим доступу:
<http://solidstate.karelia.ru/book/chapter6/part17.shtml>
13. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Книга 1
14. Уільямс Баррі. Силовая электроника: приборы, применение, управление, 1993
15. Ржанов А. В. Свойства структур металл-диэлектрик-полупроводник, 1976
16. Литовченко В. Г., Горбань А. П. Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник, 1978